



CARTES A BASE DE DSP ET INSTRUMENTATION VIRTUELLE POUR L'ANALYSE VIBRATOIRE ET/OU ACOUSTIQUE

F. CRAPART, J.L. LESUR, G. DELAUNAY

Laboratoire d'Applications de la Microélectronique, Université de Reims
B.P.347, 51062 Reims cedex - Tel: 26 05 31 07
e-mail: antoine.moineau@univ-reims.fr

RÉSUMÉ

Un système dédié à l'analyse vibratoire et/ou acoustique composé d'une partie hardware et d'une partie software est présenté dans cet article. Adaptée au contrôle en ligne non destructif, cette application peut fonctionner en mode autonome ou à l'intérieur d'un PC hôte.

La partie Hardware, réalisée autour d'un processeur de traitement du signal ADSP-2101 de chez Analog Devices, autorise des traitements temps réels et doit permettre de délivrer un diagnostic en accord avec les cadences de production.

La partie Software est une application Windows, tous les modules et outils nécessaires à la gestion et au contrôle de la partie Hardware sont regroupés sous divers menus déroulants et écrans de visualisation.

ABSTRACT

In this paper, we present a vibratory and/or acoustical analysis dedicated system which is formed by a hardware component and a software component. Suitable for non destructive on-line control, this application can run in autonomous mode or in a host computer.

The hardware component is build around an Analog Device ADSP-2101 digital signal processor, this allows to perform real time processing and to provide a diagnosis in respect with the rate of production.

The software component is a based-Windows application, all necessary modules and used tools for management and control of hardware component are accessible with several popup menus and display screens.

1. INTRODUCTION

Le problème de la mesure de grandeurs physiques, caractérisant le comportement dynamique de systèmes complexes et le contrôle de leur évolution sous des contraintes imposées, requiert de plus en plus de hautes performances en termes de flexibilité, de précision et de rapidité dans l'estimation des variables pertinentes.

Les contraintes précédentes, associées à celles de diagnostic automatique, d'autotest et de calibration ont conduit les scientifiques et les ingénieurs vers le développement de nouveaux concepts d'instrumentation de mesures durant ces dernières années [1], [2].

Cette nouvelle approche découle de celle plus classique qui consistait à mesurer une grandeur d'influence avec un appareil dédié pour être ensuite exploitée par un système informatisé de traitement de données. Le système de traitement acquiert plusieurs variables caractéristiques et restitue des informations pertinentes au travers d'indicateurs lesquels, meilleurs que d'autres, sont suivis pour déterminer le comportement dynamique du système sous contrôle.

Parallèlement, l'utilisation de l'instrumentation numérique s'est largement répandue, grâce au développement à la fois du traitement du signal et des techniques de conversion analogique numérique, plus rapides et de meilleure résolution [3], [4].

Dans ce contexte et en collaboration avec une entreprise, nous avons conçu et réalisé un ensemble complet d'acquisition et de traitement dédié à l'analyse vibratoire et/ou acoustique de machines tournantes. La finalité est d'établir un diagnostic automatique sur l'état de ces machines, soit lors d'un contrôle non destructif effectué en fin de ligne de montage, soit en laboratoire pour des tests plus approfondis de vieillissement.

2. DEFINITION DU PROBLEME

L'objectif fixé est de réaliser une étude spectrale en temps réel de quelques Hz à 500 Hz pour l'analyse vibratoire et jusqu'à 20 KHz pour l'analyse acoustique, ceci grâce à la conception d'un banc test de contrôle qualité en ligne. Les tests à réaliser ayant été définis au préalable, le dispositif doit pouvoir fonctionner en mode autonome. De plus, la durée du contrôle en ligne doit respecter les cadences de production, soit quelques dizaines de secondes.

Le système doit également faciliter la mise en oeuvre d'outils d'analyse et de traitement des signaux par l'implantation des algorithmes correspondants, directement sur la chaîne d'acquisition et de mesure. La charge de calcul de ces algorithmes et les contraintes énoncées précédemment nécessitent l'utilisation d'un processeur de traitement du signal (DSP).



La vocation initiale d'un tel dispositif étant tout d'abord l'analyse spectrale, les principales caractéristiques à prendre en compte sont la fréquence d'échantillonnage, le traitement analogique des signaux, le nombre de voies d'acquisition, la capacité mémoire fixée par la durée des enregistrements à étudier, les possibilités de pré-déclenchement, les qualités métrologiques et l'ergonomie. Ces diverses considérations ont conduit à étudier plus particulièrement les étapes suivantes:

Le conditionnement des signaux.

L'acquisition et la conversion numérique des données.

Le transfert des données vers l'UC afin de pouvoir à leur exploitation

3. PRESENTATION DU SYSTEME REALISE

L'approche réalisée concerne le domaine de l'instrumentation virtuelle associant deux parties complémentaires: une partie matérielle qui réalise l'acquisition et le traitement des signaux et une partie logicielle qui se charge de la présentation des résultats.

3-a Partie Hardware

La réponse au cahier des charges a conduit à l'élaboration d'un ensemble d'acquisition et de traitement (Fig.1) basé sur une architecture Convertisseur A/N + DSP. Cet ensemble se compose de 3 cartes compatibles PC dans la version de base [5].

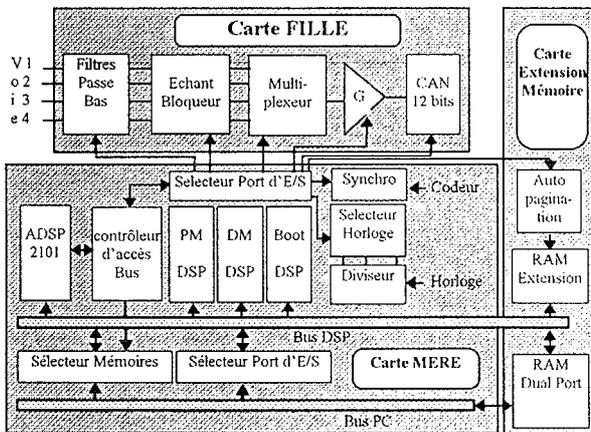


Fig. 1: Représentation fonctionnelle du système d'acquisition et de traitement

La **CARTE MERE** réalisée autour de l'ADSP-2101 de chez Analog Devices, supporte la partie logique de commande d'acquisition de données. Elle peut accueillir jusqu'à 8 cartes **FILLE**.

Chaque **CARTE FILLE**, comporte 4 voies d'acquisition pour un seul convertisseur analogique numérique et réalise la fonction de traitement analogique et de conversion du signal.

L'acquisition de divers signaux simultanément nécessite l'emploi de conditionneurs distincts sur chacune des voies concernées. Aussi, chaque voie possède un filtre anti-repliement programmable du 8ème ordre, pour des fréquences

de coupure s'échelonnant de 200 Hz à 25 KHz ainsi qu'un gain propre par l'intermédiaire d'un amplificateur à gain programmable.

Le CAN (AD1671) a un temps de conversion de l'ordre de la μ s ce qui permet en théorie l'obtention de spectres jusqu'à 500 KHz sur une seule voie (en l'absence de filtre anti-repliement).

L'étude des régimes transitoires nécessitant une place mémoire importante, nous avons doté notre dispositif d'une **CARTE EXTENSION MEMOIRE**. En effet, L'ADSP-2101 ne dispose que d'une zone mémoire de données de 16 Kmots, d'autant plus réduite qu'elle est partagée ici entre les ports d'E/S, les mémoires Dual Ports et le traitement des données. Ce problème a donc été résolu grâce à l'utilisation d'une mémoire paginée. La capacité du dispositif est alors augmentée de 1 Méga Mots (extensible à 4 Méga Mots), découpé en pages de 1 Kmots. Vue du DSP, cette mémoire vaut 1 Kmots et se comporte comme un buffer circulaire [6]. La pagination est automatique et se réalise sur une adresse de fin de page définie par l'utilisateur.

Le **port codeur** et le **port horloge** permettent soit de générer des interruptions externes sur des événements précis (position angulaire particulière d'un organe tournant) ou encore d'échantillonner en fonction de positions angulaires déterminées au préalable (échantillonnage à $\Delta\theta$ constant) [7].

Cette fonctionnalité doit permettre de modéliser les régimes transitoires de la machine tournante, très riches en informations, en fonction de sa vitesse de rotation.

3-b Partie Software

Rappelons que ce dispositif doit intégrer une unité de production et, par conséquent, peut être amené à être utilisé par du personnel qui n'est pas forcément spécialiste en matière d'acquisition de données et d'interprétation des résultats d'expériences.

Aussi la seconde partie, tout aussi importante, de ce projet a été de réaliser une interface homme-machine. Celle-ci constitue l'interface utilisateur qui doit oublier (voire ne pas connaître) l'existence de la partie électronique. Ainsi, elle doit être la plus conviviale possible et doit transmettre à partir d'une manipulation simple et rapide toute la puissance du matériel. De même, les résultats doivent être présentés clairement de manière à permettre une première analyse rapide.

L'environnement Windows est désormais devenu d'usage courant dans la plupart des applications dédiées (LabVIEW ou LabWindows par exemple). Sa souplesse d'utilisation et l'étendue des outils de programmation qu'il supporte en font un logiciel très apprécié. Nous avons donc choisi de développer notre interface graphique sous le logiciel C/C++ pour Windows, ce qui autorise l'utilisation de fonctions spécifiques (graphisme, fenêtrage, menus déroulants, boutons et gestionnaire d'impression) déjà existantes et facilement gérables.

Cette interface se compose d'un premier écran de contrôle (Fig.2) sur lequel on trouve principalement deux fenêtres de

visualisation des données temporelles et fréquentielles. A gauche de ces écrans un jeu de boutons permet par simple action de la souris de choisir et d'afficher la carte et la voie concernées par l'acquisition.

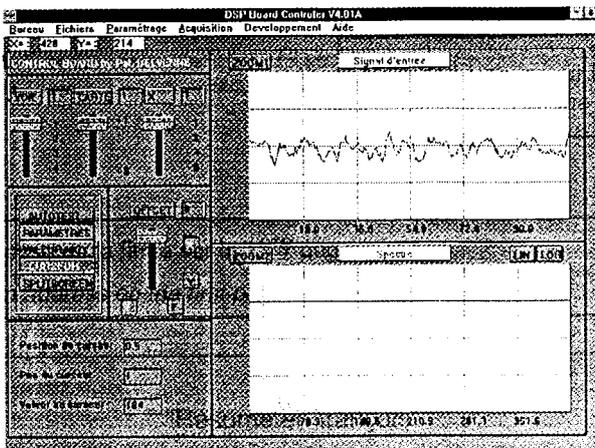


Fig.2: Ecran de contrôle

Par un choix de menus déroulants, on accède au choix et au transfert en RAM interne du DSP du programme à exécuter, mais également à la configuration des cartes filles en programmant les divers modules de chacune des voies pour chaque carte disponible (Fig.3).

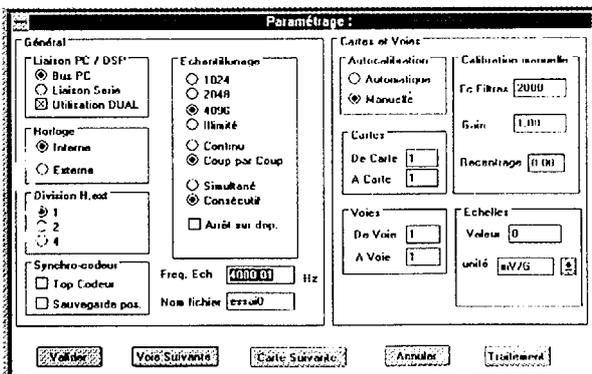


Fig.3: Ecran de paramétrage

Le logiciel est doté d'une fonction de sauvegarde des fichiers temporels et fréquentiels qui peuvent être alors transcrits sous différents formats afin éventuellement de les exploiter avec d'autres logiciels présents dans l'environnement Windows tels que MATLAB ou EXCEL.

4. L'ANALYSE SPECTRALE

L'analyse spectrale a connu ces dernières années un développement important. Des méthodes classiques telles que la transformée de Fourier sont fréquemment utilisées, conjointement avec des méthodes plus sophistiquées utilisant une modélisation plus précise du signal. Cette sophistication croissante allant de pair avec une complexité de calcul plus importante, il semblait naturel d'étudier ces différentes méthodes afin de solutionner au mieux le problème traité.

Ce choix fut conditionné autant par la contrainte matérielle (emploi d'un DSP) que par la notion de temps réel

(contrôle en ligne). Le respect de ces contraintes a permis de favoriser l'approche non-paramétrique au détriment de l'approche paramétrique. Ainsi les modèles dérivés de l'approche temporelle, tels que les modèles AR, la méthode de Prony, etc., sont connus pour fournir une haute résolution spectrale; toutefois, ils ne sont pas aussi bien adaptés lorsque des contraintes de calculs temps réels ou très rapides sont nécessaires [8]. Nous avons alors choisi d'effectuer l'analyse vibratoire de nos signaux en utilisant des algorithmes de transformée de Fourier dits à "Twiddle Factor", dérivant directement de l'algorithme de Cooley-Tuckey. Une étude plus poussée de cette famille d'algorithmes a montré que les algorithmes "Radix-4" et "Split-radix" étaient les plus performants [9] et notre choix s'est tout naturellement porté sur eux. Ces algorithmes ont de plus la particularité d'effectuer leurs calculs en place et utilisent pour cela la spécificité des buffers circulaires des DSP. Cependant, la configuration de notre espace mémoire ne permet d'adresser que 2 buffers circulaires de 2 K mots, limitant par là même la taille du calcul de la FFT pouvant être effectuée en place. Aussi afin d'étendre les calculs à des FFT de longueurs supérieures à 2 K mots, nous avons développé une technique pour découper nos calculs en blocs de la taille d'un buffer circulaire. Cette méthode a pu être développée ici grâce à l'utilisation de la mémoire extension qui permet le stockage des échantillons lors des calculs intermédiaires. Initialement appliquée à un algorithme Radix-2, cette méthode permet d'étendre le calcul des FFT sur un nombre de points très élevé, en simple et/ou en double mot [10]. En conséquence, nous pouvons améliorer nettement la lisibilité des spectres en conservant à la fois une résolution spectrale correcte, même lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente, tout en s'affranchissant des problèmes de précision liés aux calculs sur des nombres au format fixe.

L'intérêt de disposer d'une mémoire aussi importante ouvre également des perspectives très intéressantes pour le calcul de transformées de Fourier glissantes (spectrogramme), ou l'exploitation de représentation du type temps-fréquence, comme la représentation de Wigner-Ville par exemple.

5. APPLICATION A L'ANALYSE VIBRATOIRE ET AU DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DE MACHINES TOURNANTES

L'étude et le suivi des vibrations d'une machine au cours de son fonctionnement sont basés sur le principe que toute machine produit des vibrations. Quand une machine fonctionne convenablement les vibrations associées sont faibles et constantes. Cependant quand les défauts se développent ou bien quand la dynamique de la machine évolue, le spectre du signal vibratoire change. Pour la plupart des machines, le spectre vibratoire d'une machine saine a une forme caractéristique (Fig.4) qui évoluera au fur et à mesure de l'apparition de divers défauts susceptibles de se manifester au cours de la durée de vie de cette machine. Ainsi, tout défaut naissant sur une machine produit un ensemble de composantes vibratoires qui lui est propre (Fig.5), permettant ainsi de



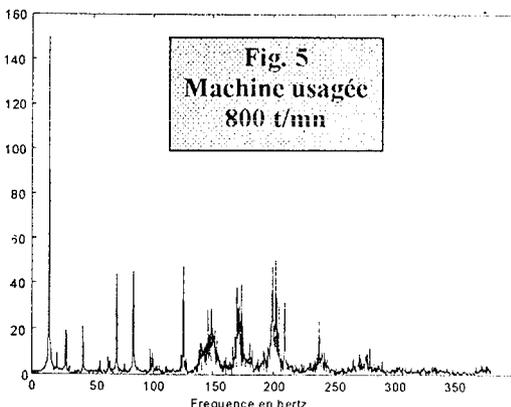
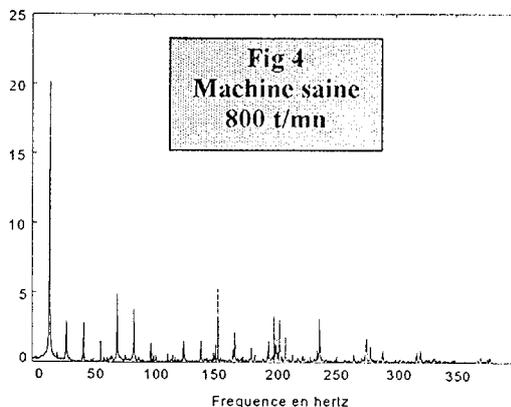
l'identifier parmi les divers défauts susceptibles de se manifester dans le cycle de vie cette machine [11].

L'analyse spectrale réalisée à partir de la Transformée de Fourier demeure un outil privilégié pour réaliser de telles études, en effet, les composantes vibratoires de faible amplitude ne sont pas masquées par la présence d'autres composantes voisines de niveau beaucoup plus élevé contrairement à l'analyse temporelle. Son intérêt est de pouvoir dissocier et identifier les sources vibratoires en fonction des caractéristiques cinématiques des différents éléments constitutifs et de leur vitesse de rotation.

Enfin, l'analyse vibratoire peut également être effectuée directement sur le signal temporel par l'utilisation de tests statistiques (moyenne, variance, Skewness et Kurtosis) pour la détermination de défauts plus particuliers, tels que des défauts de roulements par exemple.

La finalité, est bien entendu, de réunir une banque de données de défauts suffisante afin de pouvoir associer des règles de décision automatique à partir du contenu spectral ou du contenu temporel d'une nouvelle acquisition ceci pour rendre plus précis le diagnostic effectué à partir des mesures.

Dans l'état actuel, le logiciel d'interface dispose, sur l'écran de contrôle (Fig.2), d'un curseur donnant la position et l'amplitude des différentes composantes spectrales ou temporelles. Nous pouvons également afficher un tableau des raies spectrales dont les amplitudes sont supérieures à un seuil fixé. Celui ci permet par le suivi de l'évolution des raies du spectre ou par l'observation de nouvelles raies (défaut de roulement par exemple) de visualiser l'apparition éventuelle de défauts au cours du vieillissement de la machine.



6. CONCLUSION

A partir des concepts de l'instrumentation virtuelle, nous avons réalisé un système d'acquisition et d'analyse dédié au diagnostic de machines tournantes par analyse vibratoire et/ou spectrale. Ce système, utilisant conjointement une carte d'acquisition, un DSP et des algorithmes de traitement du signal, est entièrement configurable et pilotable par l'interface logicielle développée sous WINDOWS.

D'un point de vue général, les résultats obtenus montrent qu'il est possible de détecter des défauts et d'établir un diagnostic rapide lors d'un contrôle en ligne non destructif. Le suivi du vieillissement de la machine tournante, ou de ses composants, peut être réalisé par le suivi de l'évolution des raies que nous avons identifiées.

De plus, l'évolution dans le temps de l'amplitude d'une ou plusieurs raies pourrait alors fournir un indicateur du niveau de vieillissement de la machine étudiée.

REFERENCES

- [1]: G.C. Barney, *Intelligent Instrumentation: Microprocessor Applications in Measurement and Control*, Prentice/Hall Int., Exeter (UK), 1985.
- [2]: T.T. Lang, *Computerized Instrumentation*, J.Wiley & Sons, Chichester (UK), 1991.
- [3]: A.C. Stover, *ATE: Automatique Test Equipment*, McGraw-Hill Co., New York, 1984.
- [4]: A.J. Bouwens, *Digital Instrumentation*, McGraw-Hill Co., New York, 1984.
- [5]: J.L. Lesur, "Réalisation d'une carte d'acquisition destinée à l'analyse vibratoire du lave linge", *Mémoire d'ingénieur CNAM*, 1994.
- [6]: ANALOG DEVICES, *ADSP-2100 Family User's Manual*, Editions Prentice Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey, USA, 1993.
- [7]: F. Crapart, H. Fenniri, A. Moineau, G. Delaunay, "Phase angle estimation algorithms for detecting faults by synchronous analysis of rotating machines", in *Proc. of the 3rd IFAC/IFIP Workshop on "Algorithms Architectures for Real Time Control"*, pp. . Ostend, 31 May-2 June 1995.
- [8]: C. Offeli and D. Petri, "The influence of windowing on the accuracy of multifrequency signal parameter estimation", in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 256-261, vol. 41, no. 2, April 1992.
- [9]: P. Duhamel and M. Vetterli, "Fast Fourier transforms: a tutorial review and a state of the art", in *Signal Processing*, pp. 259-299, vol. 19, 1990.
- [10]: F. Crapart, "Implantation d'algorithmes rapides sur carte d'acquisition et de traitement du signal dédiée à la surveillance et au diagnostic en analyse vibratoire", in *Proc. of the Workshop "Adéquation Algorithmes Architectures"*, pp. 75-82, Grenoble, France, 20-21 January 1994.
- [11]: D. Carreau, "Surveillance des roulements par l'analyse des vibrations", in *CETIM-Informations*, n°115, April 1990.